ИМПУЛЬСНЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРОБОЙ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД. (Достижения высоковольтников ТПУ за 60 лет)

В.Я. Ушаков

Томский политехнический университет
E-mail: rcr@tpu.ru

Показан большой вклад представителей Томской школы высоковольтников в изучение механизмов импульсного электрического пробоя жидких и твердых диэлектриков, в создание научных основ проектирования изоляции высоковольтных наносекундных устройств, в разработку электроразрядных технологий (электроимпульсное бурение, дробление и дезинтеграция, очистка поверхностей и др.)

1. Физика импульсного электрического пробоя жидкостей

Первоначально интерес томских высоковольтников к проблеме электрической прочности жидких диэлектриков и ее зависимости от условий их эксплуатации в высоковольтном маслонаполненном оборудовании был обусловлен нуждами развивающейся сибирской энергетики. Низкие зимние температуры создали ряд проблем для эксплуатации оборудования открытых подстанций. Исследования электрической прочности товарного трансформаторного масла и масла с различными добавками при различных температурах позволили найти эффективные способы уменьшения их вязкости при пониженных температурах без заметного снижения электрической прочности (в частности, введением в масло кумароновой смолы).

В последующем работы по пробою жидкостей стимулировались развитием электроимпульсной технологии, что существенно расширило набор исследуемых жидкостей и диапазон условий, при которых реализуется пробой. Аспирантами кафедры техники высоких напряжений (ТВН) А.И. Лимасовым, А.И. Проскуриным, В.Я. Симоновым были исследованы вольтсекундные характеристики жидкостей, которые потенциально пригодны в качестве промывочных в электроимпульсной технологии бурения скважин (трансформаторное масло, дизельное топливо, очищенная и водопроводная вода, буровые растворы, используемые при механическом бурении и др.). Аспирант В.В. Кривко исследовал вольтсекундные характеристики некоторых жидкостей при одновременном воздействии высокой температуры и давления, воспроизводящем условия работы жидкостей в призабойной зоне при бурении глубоких скважин.

Результаты этих исследований положены в основу выбора промывочных жидкостей, конструкции породоразрушающих инструментов, параметров импульсов рабочего напряжения.

В эти годы (конец 50-х – начало 60-х гг. прошедшего столетия) началось бурное развитие новой отрасли науки и технологии – мощной импульсной энергетики (*Pulsed Power*), которая вобрала в себя сильноточную электронику, инерционную термоядерную энергетику, лазерную и ускорительную технику.

Жидкие диэлектрики, включая такие экзотические изоляционные жидкости как деионизованная вода, этиловый спирт, глицерин и их смеси, вызва-

ли повышенный интерес благодаря ряду их достоинств, особенно ярко проявляющихся при микросекундных и наносекундных длительностях импульсов напряжения.

Стало очевидным, что уровень представлений о механизме пробоя жидкостей на начало 60-х годов не отвечал этому возрастающему интересу. Это послужило стимулом для развертывания во многих развитых странах исследований природы и основных закономерностей импульсного электрического пробоя жидкостей. В 1962 г. аспирантом кафедры В.Я. Ушаковым в Энергетическом институте им. Г.М. Кржижановского (ЭНИН) были начаты исследования пространственно-временных закономерностей пробоя жидкостей с использованием электронно-оптической аппаратуры, обладающей большим временным и пространственным разрешением, рис. 1 [1]. Список монографий сотрудников каф. ТВН и НИИ ВН, обобщающих результаты выполненных ими исследований в области пробоя диэлектрических материалов и сред, приведен в [2].

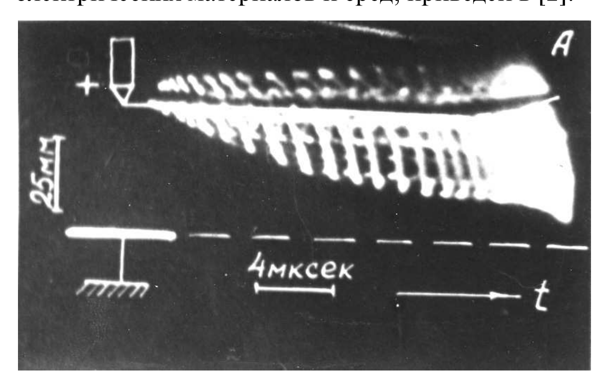


Рис. 1. *Картина разряда в этиловом спирте при воздействии импульса 1,2/70 мкс*

Было установлено, что лидерный процесс в жидкостях в длинных (миллиметр и более) разрядных промежутках с неоднородным полем формируется за счет преобразования первичных каналов, представляющих собой тонкие (2...4 мкм) плазменные каналы с малой электропроводностью. Относительно медленное развитие этих каналов и быстрое (более 10^7 см/с) их преобразование в высокопроводящий лидерный канал обуславливают толчкообразное удлинение канала пробоя.

С 1965 по 1974 гг. эти исследования были продолжены на кафедре ТВН ТПИ и в НИИ высоких напряжений под руководством В.Я. Ушакова и В.В. Лопатина.

Полученные к 1974 г. данные о динамике предпробивных и пробивных процессов, по основным электрофизическим характеристикам канала пробоя, а также установленный факт анодного, а не катодного, как считалось ранее, инициирования разряда положены в основу проектирования изоляции формирующих и накопительных линий и разработки сильноточных искровых коммутаторов с жидкой изоляцией (В.М. Муратов, Н.К. Капишников и др).

Прогресс в понимании тонких механизмов пробоя жидкостей мог быть достигнут только на основе более глубоких знаний о структуре и свойствах диэлектрических жидкостей и экспериментальных данных о деталях предразрядных и разрядных процессов и явлений.

Особенности электрического разряда в жидкостях (многообразие и сложность явлений, малые характерные размеры изучаемых фрагментов разряда ≤ 10 мкм, высокие скорости развития $\sim 10^5...10^7$ см/с) предъявляют чрезвычайно высокие требования к экспериментальному оборудованию.

В начале 80-х гг. в НИИ высоких напряжений при ТПУ были разработаны интерференционные и теневые методы лазерной диагностики явлений, связанных с изменением комплексного показателя преломления исследуемой среды, включая создание алгоритмов восстановления профиля диэлектрической проницаемости возмущенной среды по амплитуде и фазе диагностической волны с учетом дифракции, рефракции, поглощения. Был создан диагностический комплекс, включающий:

- He-Ne – лазер с активной синхронизацией мод, обеспечивающий следующие параметры единичного импульса: длительность 1 нс, энергия 40 мДж, длина волны 0,632 мкм, нестабильность появления импульса срабатывания разрядника <1 нс;
- систему синхронизации, позволяющую производить зондирование промежутка в диапазоне 0,1...1000 мкс относительно начала высоковольтного импульса;
- двухкадровую систему с пространственным разделением зондирующих пучков;
- двухкадровую однаракурсную систему с поляризационным разделением пучков;
- интерферометр Саньяка с треугольным ходом лучей, расположенным вне объекта исследования.

На рис. 2 показан образец информации, получаемой с помощью такой аппаратуры. Полученные с помощью этого диагностического комплекса результаты явились важной составной частью богатого материала, накопленного в ведущих научных школах СССР и России, Франции, США, Великобритании, Норвегии, Японии, Польши, Китая, Индии и некоторых других стран к концу прошедшего столетия. Обобщение и анализ этого материала подтвердил сделанный ранее вывод о том, что в зависимости от условий пробоя существует несколько различных механизмов пробоя. Установлено также, что две основных стадии пробоя инициирования (зажигание) разряда и развитие разряда – могут отличаться по своей природе даже в одном акте пробоя. В первом случае события в жидкости развиваются вблизи неподвижного металлического электрода, во втором – вблизи головки плазменного канала, перемещающейся в межэлектродном пространстве с большой скоростью (до $10^7...10^8$ см/с).

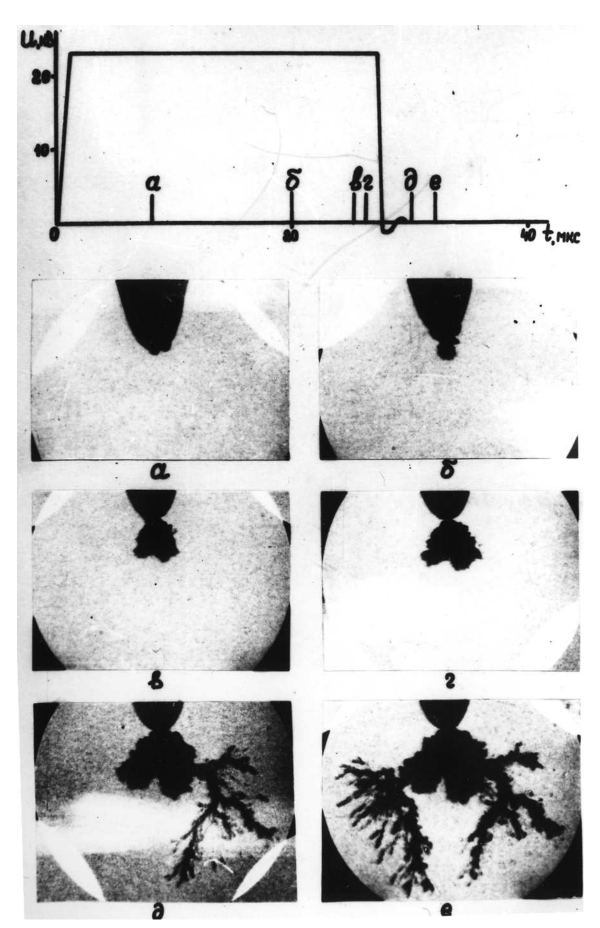


Рис. 2. *Теневые картины развития разрядных явлений в воде с их временной привязкой к импульсу напряжения, приложенного к межэлектродному промежутку. Экспозиция – 60 нс*

Для стадии **зажигания разряда** можно выделить, как минимум, четыре различных механизма: 1) *пузырьковый*, 2) *микровзрывной*, 3) *ионизационный*, 4) *электротепловой*.

Решающую роль в *пузырьковом* зажигании разряда играет газ, который существовал на электродах и в жидкости до приложения поля.

При *микровзрывном* инициировании разряда события развиваются в следующей последовательности: эмиссия электронов в жидкость (разряд с катода) или ионизация молекул жидкости (разряд с анода) – быстрый локальный разогрев жидкости током, переносимым наведенными носителями разряда, – формирование и движение ударной волны – взрывное парообразование за фронтом ударной волны – ионизация газо-паровых пузырьков – зарождение плазменного канала.

Ионизационный механизм инициирования, реализующийся при очень больших перенапряжениях, это – зарождение плазменного канала как непосредственное следствие ионизации молекул жидкости за счет автоионизации (анодное инициирование) или ударной ионизации (катодное инициирование). Энерговыделение, фазовый переход первого рода, формирование ударных волн в этом случае являются вторичными процессами.

Электротепловой механизм инициирования разряда: протекание под действием приложенного поля тока высоковольтной проводимости – разогрев жидкости в приэлектродных областях с максимальной напряженностью поля – вскипание жидкости – ионизация паро-газовых полостей – формирование зачатка плазменного канала. Этот механизм может реализовываться при больших значениях удельной электропроводности жидкости и длительности воздействия напряжения.

Для стадии **развития разряда** существенно различными можно считать три механизма (три вида разряда) 1) “быстрый” (сверхзвуковой), 2)”медленный” (дозвуковой) и 3) “электротепловой”. В первом случае пробой жидкостей обычно называют “ионизационным”, во втором – “пузырьковым”, хотя в обоих случаях первоначальное нарушение (изменение) фазового состояния жидкости происходит за счет движения носителей заряда в самой жидкости, образующихся вследствие ионизации (разряд с анода) или эмиссии и ионизации (разряд с катода), а образование плазменного канала обусловлено ионизацией в газовой фазе. Их особенности обусловлены различием в интенсивности и последовательности процессов, обеспечивающих приращение длины плазменного канала, зародившегося на стадии зажигания.

В тех случаях (достаточно редких для импульсного пробоя жидкостей), когда реализуется электротепловой механизм, пробой включает: разогрев жидкости (преимущественно ионными токами), вскипание жидкости с образованием паро-газовых полостей, ионизацию в полости. Разрядный канал удлиняется за счет движения к противоположному электроду области локального разогрева и вскипания жидкости.

Первые два вида разряда зависят от полярности инициирующего электрода, хотя и в несколько меньшей степени, чем стадия зажигания разряда.

Наиболее отчетливо ионизационный механизм пробоя проявляется в виде развития быстрых каналов с анода, пузырьковый – в виде развития медленных каналов с катода.

Наиболее сложными для количественного (и даже качественного) описания являются процессы в головке развивающегося разрядного канала и в переходной области между ней и газоразрядной плазмой, заполняющей ствол канала. Именно эти процессы обеспечивают преобразование жидкой диэлектрической среды в плазму.

Дальнейшее совершенствование экспериментальных методик, использование достижений смежных наук позволят проникнуть в тонкие механизмы преобразования диэлектрических жидкостей в плазму.

Огромные достижения последних лет в области компьютерной техники открыли новые возможности для исследования сложных процессов с помощью моделирования. Такой подход применительно к описанию электрического пробоя жидкостей реализуется в НИИ ВН под руководством В.В. Лопатина.

2. Пробой и старение твердых диэлектриков

Основатель Томской школы высоковольтников А.А. Воробьев начал исследования явления электрического пробоя еще в середине 30-х годов прошедшего столетия в начале в Ленинградском политехническом институте, а затем в Сибирском физико-техническом институте при Томском государственном университете [3–5]. Им и его коллегами было, в частности, установлено значительное снижение электрической прочности кристаллов на постоянном напряжении при создании в них центров окраски при рентгеновском облучении или введением добавок и отсутствие такого влияния при импульсном напряжении. Было также показано, что при устранении краевых разрядов электрическая прочность твердых диэлектриков при достаточно больших толщинах не зависит от материала электродов. Электрическая прочность кристаллов щелочно-галоидных солей оказалась пропорциональной энергии кристаллической решетки.

Эти экспериментальные факты были косвенными аргументами в пользу собственно электрического (электронного), а не теплового механизма пробоя твердых диэлектриков.

С переходом А.А. Воробьева в 1938 г. в ТПУ (в те годы Томский индустриальный институт) работы по физике пробоя твердых диэлектриков были развернуты особенно широким фронтом. Уже в 1951 г. А.А. Воробьев и Е.К. Завадовская [6] предложили теорию пробоя ионных кристаллов.

В 1956 г. вышла в свет монография [7], в которой были обобщены результаты исследований, выполненных в ТПИ в военные и первые послевоенные годы, а также в высоковольтной лаборатории, созданной в тридцатые годы А.А. Воробьевым в СФТИ при ТГУ.

В последующие годы было продолжено накопление экспериментальных данных о влиянии на пробой твердых диэлектриков их свойств и состояния (температура, примеси, воздействие облучения), параметров напряжения (вид напряжения, длительность, форма и параметры импульсного напряжения), конфигурации образцов (толщина образцов, степень неоднородности поля), размеры и материал электродов и др. Ориентируясь на опыт экспериментального исследования газового разряда, большое внимание стало уделяться изучению разрядных процессов в пространстве и времени. В начале это были наблюдения за каналами незавершенного пробоя оптически прозрачных диэлектриков по свечению или следам, которые они оставляют в твердом теле. Позднее предпринимались попытки применить для этого оптическую камеру с механической разверткой (типа камеры Бойса). Однако малое временное разрешение и низкая оптическая чувствительность не позволили получить дополнительные важные сведения о процессе пробоя. Лишь разработка на кафедре ТВН В.А. Бутенко и Ю.И. Кузнецовым хронографа на базе электронно-оптического преобразователя позволила Ю.И. Кузнецову впервые в 1968–1974 гг. получить качественные пространственно-временные картины импульсного пробоя оптически прозрачных твердых диэлектриков, рис. 3. Результаты этих исследований послужили одним из стимулов пересмотра Ю.Н. Вершининым [8] сложившихся представлений о механизме импульсного электрического пробоя твердых диэлектриков

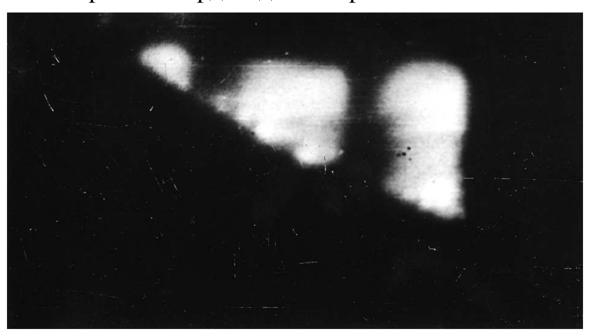


Рис. 3. *Картина разряда в кристалле NaCl. Электродная система острие-плоскость. Пробой на косоугольном фронте импульса отрицательной полярности, толщина образца 10 мм*

Результаты исследований, выполненных к 1962 г., были обобщены в докторской диссертации Г.А. Воробьева, блестяще защищенной в феврале 1963 г. во время VI Межвузовской научной конференции по пробою диэлектриков и полупроводников, и монографии [9].

Интенсивное развитие работ по технологическому использованию эффектов пересечения вольт-секундных характеристик жидких и твердых диэлектриков при больших крутизнах фронта импульсов напряжения и внедрения канала в твердый диэлектрик в системах с накладными электродами придали новый импульс и новое направление работам по пробою диэлектриков и, прежде всего, твердых. Был выполнен большой объем исследований разрядных характеристик широкой гаммы горных пород (мрамор, песчаник, сланец, кварцит, фельзит-порфир и др.) и некоторых сверхтвердых искусственных диэлектрических материалов (например, электрокорунда циркониевого) для выбора оптимальных режимов проходки скважин и дезинтеграции материалов с помощью электрических разрядов в их объеме.

Как отмечалось выше, такие же характеристики были получены для вакуума, сжатых газов и жидкостей как потенциальных сред, играющих роль рабочей среды. В случае бурения скважин и резки щелей жидкости рассматриваются еще и как средство для очистки забоя от шлама.

Материалы этих исследований в части, касающейся пробоя диэлектрических сред и горных пород, обобщены в монографии [10], а основы и технологические аспекты электроимпульсного разрушения материалов обобщены в докторских диссертациях И.И. Каляцкого (1965 г.), А.Т. Чепикова (1969 г.), В.И. Курца (1988 г.), Б.В. Семкина (1990 г.), и в монографиях [11–14].

Потребовалось так же организовать поиск твердых диэлектриков, в наибольшей мере удовлетворяющих требованиям, предъявляемым к изоляционным и, одновременно, конструкционным материалам породоразрушающих инструментов и систем передачи импульсов к забою. Необходимо было изучить их многоимпульсную прочность (т.е. срок службы) в лабораторных и полигонных условиях (В.С. Дмитревский, В.Г. Сотников, И.И. Сквирская). Выбор был сделан в пользу полиэтилена. Была разработана технология переработки гранулированного полиэтилена в готовые изделия (изоляторы) или заготовки и налажено их мелкосерийное производство. Переход к полигонным испытаниям установок для бурения скважин и к выполнению заказов сторонних потребителей установок для дезинтеграции материалов показали, что изоляторы породоразрушающих инструментов являются одним из наиболее слабых звеньев технологических установок.

Набор статистики по отказам изоляторов, изготовленных при различных технологических режимах, при различных условиях нагружения электрическим полем с 1974 г. стал дополняться исследованиями механизмов старения моментной полимерной изоляции, которые возглавили В.Я. Ушаков, В.Ф. Важов, И.И. Сквирская. Результаты исследований, полученные к 1987 г., были обобщены в монографии [15]. Было, в частности, установлено, что в условиях отсутствия частичных разрядов (ЧР) электрическое старение и пробой полимерных диэлектриков обусловлены последовательно-параллельным протеканием следующих процессов: появление свободных носителей заряда, вызывающих наклонение объемных зарядов и изменение молекулярной и надмолекулярной структуры полимеров, образование микротрещин, развитие древовидного побега – дендрита (*treeng*). Показана связь ресурса со свойствами полимеров, условиями их эксплуатации и технологией производства. Были предложены новые способы диагностики состояния изоляции, прогнозирования сроков её службы и отбраковочных испытаний.

Под руководством С.Г. Боева в 80-е годы был разработан комплекс методов зондирования электрического поля в диэлектриках ионизирующим излучением, не имеющий аналогов. Изучены основные закономерности накопления объемного заряда в диэлектриках в результате облучения их заряженными частицами. Основные результаты опубликованы в монографии [16]. Развиты физическая модель метода акустического зондирования электрического поля и поляризации в диэлектриках, методика и техника измерений этим методом. Его использование позволило наблюдать эволюцию объемного заряда и поляризации в диэлектриках со временем и при воздействии различных факторов, конкретизировать влияние объемного заряда на электрическое старение полиэтилена. Выполняются работы по совершенствованию изоляционных конструкций (например, кабелей) в направлении благоприятного распределения электрического поля (С.М. Лебедев, О.С. Гефле). Наиболее полно они отражены в докторской диссертации С.М. Лебедева (2003 г.)

Большое разнообразие высоковольтных электрофизических установок, непрерывное и достаточно быстрое ужесточение режимов их работы обусловливают повышение требования ко всем элементам этих устройств, и прежде всего, к электрической изоляции. Особую актуальность приобрели вопросы надежности и долговечности работы изоляции в условиях воздействия на нее не только импульсных электрических полей высокой напряженности, но ряда специфических факторов, характерных только для работы изоляции в электрофизических установках: потоков заряженных частиц, излучений различного спектрального диапазона, высокоскоростных потоков диэлектрической среды (газов, жидкостей), высокой температуры и др. В этой связи широкое развитие в НИИ ВН получили работы в области высокотемпературной изоляции на основе нитридной и оксидной керамики (рук. В.В. Лопатин).

На уникальном стенде, созданном в институте, отработаны методики и проведены исследования свойств керамических диэлектриков при температурах до 2200 °С. Определена взаимосвязь оптических и диэлектрических свойств со структурной иерархией и параметрами локализованных состояний в запрещенных зонах, образованных биографическими и радиационными дефектами.

Следующим этапом работ в области термостойкой изоляции стал поиск способов целенаправленного изменения её свойств. Было установлено, что облучение термостойких неорганических диэлектриков ионами флюенсом $10^{15}...10^{17}$ см$^{-2}$ формирует в приповерхностном слое квазиравновесную систему с измененными оптическими, механическими и диэлектрическими свойствами. Это метастабильное состояние можно стабилизировать постимплантационной термообработкой в вакууме или другой не восстанавливающей среде. К изменению свойств приводят: радиационное дефектообразование, диффузия и кластеризация дефектов, фазовые превращения. Интенсивное облучение может изменять структурную иерархию материалов: плотность дислокации и дефектов упаковки, размеры структурных фрагментов-кристаллитов и их агрегатов в результате фазовых переходов и аморфизации (или обратного процесса-рекристаллизации). Структурно-энергетические изменения в состоянии поверхностных слоев определяют закономерности изменения свойств. Обнаруженный эффект перехода диэлектрик-полупроводник при ионно-термической обработке, заключающийся, в том числе, и в гигантском увеличении проводимости, может найти практическое применение в радиационных технологиях. Материалы этих исследований обобщены в обзоре [17] и в докторских диссертациях В.В. Лопатина [18] и А.В. Кабышева [19].

Явление внедрения разряда в толщу твердого диэлектрика при определенных условиях было предложено использовать для создания разрядников тригатронного типа с твердой изоляцией рабочего (основного) промежутка (С.Г. Коршунов, В.М. Пайгин). Стремление уменьшить индуктивность и сопротивление искровых коммутаторов сильноточных источников большой мощности привело к идее использовать в таких разрядниках твердые диэлектрики, обладающие большей, чем сжатые газы электрической прочностью и позволяющие благодаря этому уменьшить габариты устройства. Проблемы управляемого запуска и работы в частотном режиме препятствуют широкому применению таких коммутаторов. В значительной мере их удается решить, если по аналогии с тригатроном с газовой изоляцией «поджигающую» (инициирующую) искру создавать в толще твердого диэлектрика. Ее образование приводит к быстрому и сильному искажению электрического поля в основном промежутке, нарушению сплошности материала и, как следствие, к пробою (замыканию) основного промежутка. Найдены оптимальные параметры пускового импульса и поджигающего промежутка для разных уровней коммутируемого напряжения.

Заключение

Следует признать, что фундаментальные исследования вообще и в области физики пробоя, в частности, в последние полтора десятилетия в значительной мере свернуты из-за недостаточной финансовой поддержки со стороны государства и отсутствия интереса к ним со стороны руководителей промышленных предприятий, озабоченных их выживанием. Высоковольтники ТПУ вынуждены уделять основное внимание прикладным разработкам в ущерб фундаментальной составляющей высоковольтной науки – физики пробоя диэлектрических материалов и сред.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ушаков В.Я. Исследование пробоя дистиллированной воды на косоугольных волнах положительной полярности // Сб. докл. IV Межвуз. научной конф. по пробою диэлектриков и полупроводников. – февраль 1963 г., Томск. – М.: Энергия, 1964. – С. 207–211.
2. Ушаков В.Я. Импульсные разряды в вакууме и газах. Достижения высоковольтников ТПУ за 60 лет // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309. – № 2. – С. 54–58.
3. Воробьев А.А. Электрический пробой рентгенизированной каменной соли // Доклады АН СССР. – 1934. – Т. 3. – № 6. – С. 424–425.
4. Воробьев А.А., Красин А.К. Пробой твердых диэлектриков с различно нанесенными электродами // Журнал технической физики. – 1937. – Т. 7. – Вып. 15. – С. 1560–1569.
5. Воробьев А.А. Об электрическом пробое изолирующих кристаллов // Журнал технической физики. – 1940. – Т. 10. – Вып. 14. – С. 1183–1189.
6. Воробьев А.А., Завадовская Е.К. К теории электрического пробоя твердых диэлектриков // Доклады АН СССР. – 1951. – Т. 81. – С. 375–377.
7. Воробьев А.А., Завадовская Е.К. Электрическая прочность твердых диэлектриков. – М.: ГИТТЛ, 1956. – 332 с.
8. Вершинин Ю.Н. Электронно-тепловые и детонационные процессы при электрическом пробое твердых диэлектриков. – Екатеринбург: УрО РАН, 2000. – 258 с.
9. Воробьев А.А., Воробьев Г.А. Электрический пробой и разрушение твердых диэлектриков. – М.: Высшая школа, 1966. – 224 с.
10. Воробьев А.А., Воробьев Г.А., Завадовская Е.К. и др. Импульсный пробой и разрушение диэлектриков и горных пород. – Томск: Изд-во ТГУ, 1971. – 225 с.
11. Воробьев А.А. Разрушение горных пород электрическими импульсными разрядами. – Томск: Изд-во ТГУ, 1961. – 150 с.
12. Усов А.Ф., Семкин Б.В., Зиновьев Н.Т. Переходные процессы в установках электроимпульсной технологии. – Л.: Наука, 1987. – 189 с.
13. Семкин Б.В., Усов А.Ф., Курец В.И. Основы электроимпульсного разрушения материалов. – СПб.: Наука, 1995. – 276 с.
14. Курец В.И., Усов А.Ф., Цукерман В.А. Электроимпульсная дезинтеграция материалов. – Апатиты: Изд-во Кольского НЦ РАН, 2002. – 324 с.
15. Ушаков В.Я. Электрическое старение и ресурс монолитной полимерной изоляции. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 152 с.
16. Боев С.Г., Ушаков В.Я. Радиационное накопление заряда в диэлектриках и методы его диагностики. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 240 с.
17. Lopatin V.V. Electrical Transport Properties of BN // In Book: Properties, Group III. Nitrides / Edit by J. Edgar. – London: Published IEE, 1994. – P. 89–111.
18. Лопатин В.В. Физико-технические основы применения нитридной керамики в электрофизической аппаратуре. Автореф. дис. ... д.ф.-м.н. – Томск, ТПУ, 1993. – 68 с.
19. Кабышев А.В. Ионно-термическая модификация неорганических диэлектриков. Автореф. дис. ... д.т.н. – Томск, 2001. – 42 с.